

PEDOMETRIA E MAPEAMENTO DIGITAL: CONTRIBUIÇÕES NA CLASSIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE SOLOS

Data de aceite: 01/12/2020

Data de submissão: 11/09/2020

Waldir de Carvalho Junior

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuária
Rio de Janeiro – RJ
<http://lattes.cnpq.br/7992394393174495>

Helena Saraiva Koenow Pinheiro

UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro
Seropédica -RJ
<http://lattes.cnpq.br/6947091664236298>

Theresa Rocco Pereira Barbosa

UFSM - Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS
<http://lattes.cnpq.br/5217677044077003>

RESUMO: A Pedometria e o Mapeamento Digital de Solos ocupam um lugar importante na ciência do solo. Este ramo da pedologia, trata de estudar aspectos dos solos através de cálculos e modelos estatísticos e geoestatísticos. Atualmente tem sofrido um grande avanço em função de novas tecnologias disponíveis em vários níveis, como novas ferramentas, novos sensores, etc. A espectroscopia, os modelos digitais de elevação, e outros sensores tem disponibilizado farto material para a análise matemática pedológica, ou pedometria. A capacidade de atualizar mapeamentos com rapidez, de gerar novos mapas e com isso novas interpretações, também tem contribuído para

este avanço da pedometria. É de fato, o ramo da ciência do solo que mais tem tido avanços neste século. Assim, iniciativas em validar e implementar técnicas de mapeamento digital de solos e interpretações técnicas, disseminar o conhecimento em uso e conservação do solo e da água devem ser encorajadas, tendo em vista o cenário atual para uma agricultura de base sustentável ao produtor rural, em prol do aumento da produção, diversificação e competitividade da atividade agropecuária, em consonância com as ações do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos (PronaSolos).

PALAVRAS - CHAVE: Pedometria, MDS, Pronasolos

PEDROMETRICS AND DIGITAL MAPPING: CONTRIBUTIONS TO SOIL CLASSIFICATION AND MAPPING

ABSTRACT: Pedometrics and Digital soil mapping are very important in soil science. This this branch of pedology uses to study soils aspects by calculations and statistics and geostatistics models. Nowadays, new technologies available in several levels supportd by new tools and sensors improve in pedometrics science. Spectroscopy, digital elevation models, and others, produce wide material to pedological mathematical analysis, pedometrics. The capacity to update soil maps, to create new data and new interpretations, have account to improve the pedometrics. In fact, it is the part of soil science with more advances in the past years. So, introduce and validate these digital soil mapping techniques and inepretations must be encouraged to answer the sustainable agriculture demands, as well as to accord with

the objectives of the National Soil Program (Pronasolos).

KEYWORDS: Pedometrics, DEM, PronaSolos

1 | INTRODUÇÃO

A pedologia é o estudo do solo em sua posição natural, comumente subdividida em morfologia, fatores e processos de formação, classificação e mapeamento (Bockheim et al., 2005). Pensar pedologia buscando formular e resolver questões através de técnicas matemáticas e estatística, é pedometria e, portanto, são áreas intimamente relacionadas (Minasy et al., 2014). Um foco importante da pedometria é a capacidade de mapear. Nesse contexto entra o mapeamento digital, no qual modelos são aplicados na predição espacial de classes e propriedades do solo com erros conhecidos.

Estruturalmente, a Pedometria e o Mapeamento Digital de Solos (MDS) passaram a fazer parte de associações científicas em diferentes momentos no mundo. Em 1988 surge o grupo de trabalho em pedometria na *International Society of Soil Sciences (ISSS)*. Na *International Union of Soil Sciences (IUSS)*, é estabelecida como comissão 1.6 nominada *Pedometrics* em 2004 (Pedometrics.org; Minasy et al. 2014). No Brasil, a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), criou a comissão de pedometria em 2009 (Oliveira et al., 2015).

O termo Pedometria foi oficialmente cunhado por A.B. McBratney. A palavra é um neologismo derivado de duas palavras gregas pedos e metron, as quais significam respectivamente, solo e medição. O radical do termo é semelhante ao usado em outros campos de aplicação da estatística, como abiometria, psicometria, econometria, dentre outros (Preface of Geoderma, 1994: 62 e Minasy et al., 2014). Neste sentido, a Pedometria é a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para o estudo da distribuição, organização e gênese de solos com base em suas características numéricas.

O campo da Pedometria tem tido uma evolução constante e hoje pode ser definido como uma ciência interdisciplinar com integração da Ciência do Solo, da Matemática e Estatística Aplicada e da GeoInformação, contudo não limitada a isso, como pode ser visto na Figura 01 abaixo (Pedometrics.org).



Figura 01: Esquema da sobreposição dos temas que envolvem Pedometria (Adaptado de McBratney et al. (2003))

Pode ser considerado o resultado dos avanços e descobertas em novas tecnologias (sensoriamento remoto proximal, orbital e sub-orbital, tecnologia da informação e de equipamentos) e é importante enfatizar que a Pedometria é um campo da ciência relativamente recente e em evolução quando comparado a outros campos ou subdisciplinas da ciência do Solo.

Alguns tópicos importantes na Pedometria são: Análise e modelagem espaço-temporal da variação de propriedades do solo; Integração de dados em escalas variadas; Modelagem solo-paisagem com análise digital de terreno; Algoritmos quantitativos para classificação de solos; Desenho amostral; incorporação de informações ambientais (Sensoriamento Remoto); e agricultura de precisão (Pedometrics.org).

2 | MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS (MDS)

O MDS é uma subdisciplina bem-sucedida da ciência do solo, com uma produção ativa de pesquisa (Minasny and McBratney, 2016). O sucesso do mapeamento digital do solo é uma confluência de vários fatores, principalmente a partir do ano 2000. Entre eles podemos citar:

- aumento da disponibilidade de dados espaciais (modelo digital de elevação – MDE, imagens de satélite, geofísicos);
- disponibilidade de poder computacional para processar dados;
- desenvolvimento de ferramentas de mineração de dados e SIG;

- inúmeras aplicações da geoestatística.

Além disso, houve um aumento na demanda global por dados espaciais, incluindo avaliações de incertezas, e um rejuvenescimento de levantamentos de solo, contando com instituições que disseminam tecnologias e conhecimento de mapeamento digital do solo.

Segundo McBratney et al. (2003) e Minasny & McBratney (2016), o MDS reúne técnicas quantitativas para predição espacial em mapeamento de solos. O modelo conceitual da abordagem tradicional de mapeamento de solos pode e deve ser modernizado e atualizado pelo uso de técnicas quantitativas contemporâneas e usando todo o conjunto de dados ambientais disponíveis. As principais diferenças entre um mapeamento convencional e o digital podem ser observados na Tabela 01 abaixo.

Convencional	Digital
Escala associada ao nível de levantamento	Escala associada ao tamanho do pixel
Fatores de formação (conceito de catena)	Variáveis ambientais preditoras
Fotointerpretação e levantamento de reconhecimento	SR, atributos do terreno, dados geológicos
Nível de informação ligado a escala	Nível de informação ligado ao pixel
Dependência do expert (experiência, conhecimento da área,...)	Influência do expert
Modelo mental (não reproduzível)	Modelo matemático
Necessidade de coleta de Perfis e AE no campo – Navegação com fotos aéreas, GPS	Necessidade de coleta de Perfis e AE no campo – Navegação com imagens, GPS
Modelos discretos	Modelos contínuos ou discretos
Mapeamento de classes de solos	Mapeamento de classes ou atributos
Normalmente sem avaliação de erro	Avaliação de erro intrínseco ao processo
Modelo dirigido pelo conhecimento	Modelo dirigido pelos dados
Amostragem livre	Amostragem baseada em modelo ou esquema definido

Tabela 01. Principais diferenças e características entre mapeamento de solos convencional e mapeamento de solos digital (Adptado de Hengl, 2003)

Segundo Lagacherie & McBratney (2006), existem três componentes principais em MDS, a saber: a entrada de dados, o processamento e a saída de informação. Estes três componentes são sequenciais e podem ser definidos da seguinte maneira. A ‘Entrada de Dados’ pode ser na forma de métodos de observação de campo e laboratório, incluindo dados legados (mapas e perfis de solo) e novas observações usando técnicas estatísticas de amostragem. O ‘Processamento’ deve ser encarado em termos espaciais e não-espaciais de sistemas de inferência, incluindo modelos matemáticos ou estatísticos relacionando as

observações de solos com suas variáveis ambientais ou fatores do modelo 'scorpan'. Já a 'Saída de Informação' incorpora os sistemas de informação espacial de solos, incluindo modelos *rasters* de predição juntamente com a avaliação da incerteza. Esta saída pode rapidamente ser atualizada e disponibilizada com a entrada de novos dados.

Esses três componentes são complexos e podem estar subdivididos em outros componentes menores, de acordo com as características das áreas estudadas, da disponibilidade de dados e da finalidade dos estudos.

3 | A ABORDAGEM PEDOMÉTRICA NA COLETA DE DADOS

Segundo Carvalho Jr et al. (2014a), o Desenho Amostral é uma atividade de escritório inicial, juntamente com a busca de informações legadas e dados de sensoriamento remoto, entre outros. Após definidas as principais variáveis relacionadas ao objeto de estudo, o desenho amostral deve buscar selecionar pontos que representem a distribuição das variáveis, ou seja, criar um subconjunto de dados que seja representativo da população total.

Diferentemente do mapeamento convencional, no mapeamento digital de solos muita atenção tem sido dada para otimização da amostragem, utilizando diferentes métodos como: amostragem aleatória; amostragem aleatória estratificada; análise multivariada; lógica fuzzy e geoestatística.

De acordo com Minasny & McBratney (2006), um esquema de amostragem com base na utilização de dados auxiliares deve ser capaz de capturar toda a variação de valores das diferentes covariáveis auxiliares utilizadas.

Segundo Carvalho Jr et al. (2014b) em trabalho realizado com propósito de avaliar as técnicas de amostragem para agilizar o levantamento em escala regional, deve se levar em consideração uma restrição espacial de acessibilidade com o intuito de tornar acessível todos os locais de amostragens. Para isso, o autor considerou que todos os pontos de amostras precisam estar dentro de uma certa distância das estradas (acessibilidade) e com uma distância mínima de pontos já coletados (evitar sobreamostragem).

Nesse sentido, os autores definiram uma área efetiva de trabalho, considerando um 'buffer' de 100 m das estradas e uma distância mínima de 500 m de locais já amostrados. Neste trabalho os autores usaram como variáveis auxiliares o modelo digital de elevação (MDE), a declividade, a curvatura e o uso e cobertura do solo. Para selecionar os locais de amostragem foi usado o Hipercubo Latino Condicionado (CLHs).

Como resultado do processo de desenho amostral, os autores não encontraram diferenças significativas entres o conjunto total de dados, o subconjunto com as restrições espaciais e os 100 pontos definidos pelo CLHs.

Deve haver uma associação entre o uso de sensores remotos proximais e a coleta tradicional. Por exemplo, Dennerley et al. (2018) usou dados Gamma Espectrométricos e

Indução Eletromagnética como variáveis auxiliares no MDS para a Identificação de zonas de manejo de solo.

Falciglia et al. (2018) fizeram a avaliação quali-quantitativa de solos contaminados por ^{241}Am e ^{152}Eu (Americio e Európio), com voos de baixa altitude de drone equipado com pequeno espectrômetro de raios gamma. Conseguiram obter bons índices de detecção e comprovaram que a técnica pode ser usada para auxiliar no estudo de locais contaminados. Neste caso, com este objetivo, poderíamos usar esta tecnologia para detecção de metais pesados nos rompimentos das barragens de resíduos.

Já Gatis et al. (2019) combinou métricas obtidas com LiDAR (elevação, declive, TWI) com levantamento espectrométrico de raios gamma com 10m de pixel (detalhe para uso local), para mapear a espessura de turfeiras para manejo e estimativa de estoque de carbono.

Ji et al. (2019) usou múltiplos sensores para topografia, condutividade elétrica aparente do solo e raios gamma e espectroradiômetro VIS-NIR para prever Matéria Orgânica do Solo, pH, P, K, Ca, Mg e Al. Obteve resultados com $r^2 > 0.5$ de maneira geral, usando uma série de modelos 'data mining' (Support Vector Machine - SVM, RandomForest e CART).

Li, N. et al. (2019) usaram o MDS para dar suporte à adubação da cana de açúcar em uma área da Austrália. Usaram raios gamma e indução eletromagnética e obtiveram um $r^2 > 0.7$, propiciando uma utilização bastante objetiva desta tecnologia.

Reinhardt & Herrmann (2019) fizeram uma revisão crítica sobre a utilização de raios gamma e concluíram que para a ciência do solo, os raios gamma tem valor pois detectam um sinal da superfície da paisagem e integram informações de volume ou de profundidade, podem ser proximais ou não e associados a outros métodos de SR podem prover informação para melhor compreender os processos de formação e a distribuição espacial de propriedades dos solos.

4 | ESPECTROSCOPIA: VIS-NIR-MIR

Uma das vantagens de usar esta tecnologia para análise de solos é não deixar resíduos químicos, ou seja, trata-se de uma análise química limpa. Dentre os trabalhos neste campo da pedometria, **Marques, K.P.P. et al. (2019)** avaliaram como o espectro NIR pode melhorar a classificação de um perfil de solo. Já Manage, L.P.M. et al. (2019 e 2018) estimaram a densidade de partícula do solo com VNIR criando uma função de pedotransferência, bem como para características dos solos afetadas pelo teor de umidade do mesmo.

Xia, Y. et al. (2018) desenvolveram métodos de análises de dados espectroscópicos Near- and Mid-Infrared Spectroscopy para avaliar a qualidade do solo (C, N, Ca, entre outros elementos). Em outro trabalho, Cheng, H. et al. (2019) estimaram a concentração

de metais nos solos urbanos e usaram também para classificar perfis de solos com SVM.

Para analisar e avaliar carbono orgânico do solo (COS), England & Rossel (2018) utilizaram sensores proximais VNIR com bons resultados. Para quantificar diferentes formas de Fe no solo Xu, S. et al. (2018) usaram a espectroscopia V-NIR.

No Brasil, Demattê, et al. (2019) estudaram estas técnicas para construir o futuro de laboratório de solos híbrido com baixo impacto ambiental. Além disso, Demattê et al. (2020) são referência nacional na gestão da primeira Biblioteca Espectral de Solos do Brasil e uma potencial fonte de dados legados limpos. Atualmente a biblioteca consta com mais de 39000 amostras de solos, em 26 Estados e com contribuição de 46 Instituições.

Segundo Recena, R. et al. (2019) é possível avaliar a fertilidade e funções do solo por V-NIR. Já Knadel, M. et al. (2018) determinaram a superfície específica de partículas do solo por V-NIR. Moura-Bueno, J.M. et al. (2019) usaram VIS-NIR-SWIR para obter predições de COS mais acuradas, com a criação de bibliotecas espectrais e obtiveram resultados bons com $r^2 > 0.7$.

5 | MODELAGEM

A etapa de modelagem nos permite usar todo o ferramental tecnológico disponível (tanto sensores remotos quanto sistemas computacionais e bancos de dados). Neste momento, devemos estar atentos às covariáveis utilizadas. Os modelos pedométricos podem ser espaciais ou não espaciais.

Novamente aqui o sensoriamento remoto, proximal ou não, em muito contribui para o alcance dos bons resultados que temos visto no desenvolvimento e avanço das técnicas de MDS e pedometria.

Um dos principais dados de entrada utilizados no MDS é o modelos digital de elevação (MDE). Tais modelos para representação da altimetria são muito importantes e podem ser obtidos por várias técnicas (Hutchinson & Gallant, 2000), pela interpolação de feições vetoriais (pontos cotados, curvas de nível e hidrografia) ou diretamente de sensores remotos. Os MDE obtidos por sensoriamento remoto orbital estão disponíveis mundialmente, com grande cobertura de área por cena e baixo custo de processamento; porém, a qualidade das informações depende da rugosidade e da declividade do terreno (Pinheiro et al., 2012).

Os MDEs fornecem informações altimétricas e suas derivadas, normalmente correlacionadas a classes e atributos de solos. Contribuem para sua importância também a disponibilidade, acessibilidade e gratuidade destes dados. Podemos listar alguns produtos desta natureza, como por exemplo:

- SRTM
- 36,500 Satellite Images from RADARSAT-1 Now Available to the Public

- Uso combinado com outros sensores (correlação entre sensores proximais e não proximais)
- LiDAR (Light Detection And Ranging) sensor remoto ativo

Muitos estudos mostram a estreita relação entre solos (classes ou atributos) e os modelos numéricos de superfície (derivados do MDE). Por exemplo, Salazar, S.E. et al. (2019) desenvolveram um instrumento LiDAR proximal para medir propriedades dos solos insaturados com bons resultados. Já Campbell, D.M.H. et al. (2013) conseguiram mapear a resistência do solo a penetração com dados derivados também do LiDAR proximal.

Reddy, A.D. et al. (2015) estudaram a perda de C em turfeiras (organossolos) com fogo através de dados LiDAR pela avaliação da variação do modelo digital do terreno (MDT) antes e depois do fogo, com resultados muito interessantes, conforme a Figura 02.

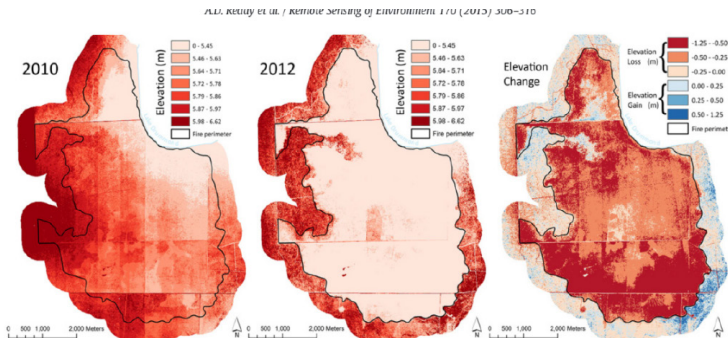


Fig. 4. Depicted are the 2010 (left) and 2012 (middle) LiDAR-derived surface elevations for the Lateral West fire scar and a 500 m buffer surrounding it. To the right, a map of elevation change calculated as the 2012 minus 2010 DEM is shown.

Figura 02. Ilustração de como foi feita avaliação de perda de carbono espacialmente (Reddy, A.D. et al. (2015)), onde são representadas as elevações de superfície derivadas de LiDAR com buffer de 500m em 2010 (esquerda) e 2012 (meio) para a cicatriz Lateral Westfire. À direita, um mapa de mudança de elevação calculado pela diferença do MDE de 2012 e 2010.

Em trabalho realizado no semiárido brasileiro, Ferraz da Silveira et al. (2018) combinaram dados MSI/Sentinel-2 e LiDAR para mapear a vegetação e suas relações com os atributos dos solos com bons resultados alcançados.

6 | O MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS

Um dos trabalhos mais citados sobre MDS, McBratney et al. (2003), definiram a modelagem com uso de modelos que levam em consideração os fatores de formação dos solos, chamado de SCORPAN, onde:

- S – Solo (propriedade ou classe)
- C – Clima
- O – organismos
- R – topografia, atributos do terreno
- P – material de origem
- A – tempo
- N – posição espacial

Neste tipo de abordagem, os estudos podem identificar quais variáveis definem cada fator de formação dos solos e quais são as mais importantes. Na Figura 03 podemos ver exemplos de variáveis que podem ser usadas para representar os fatores de formação dos solos contidos na equação SCORPAN. Na Figura 04 podemos observar o diagrama genérico para o processo de MDS focando no pré-processamento necessário ao entendimento das correlações entre as variáveis ou covariáveis ambientais e as características dos solos.

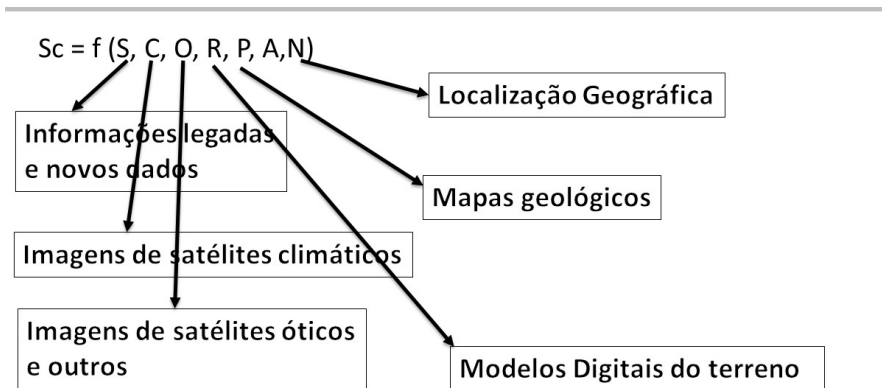


Figura 03. Variáveis relacionadas aos fatores da equação SCORPAN

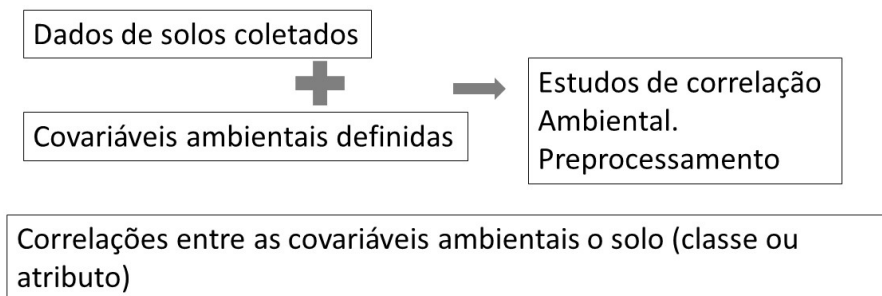


Figura 04. Diagrama genérico de um processo de MDS

As técnicas de MDS podem ser divididas, segundo McBratney et al., 2003 e Carvalho Jr et al., 2014, em CLORPT, Geoestatísticas ou híbridas (Figura 05). Nas técnicas CLORPT, os modelos são determinísticos, com relação de causa e efeito. São usadas variáveis exógenas para clima, organismos, tempo e uso da terra. Os modelos empíricos mais usados são as regressões lineares, regressões polinomiais, modelos baseados em árvores, entre outros. Nas técnicas Geoestatísticas, abordando uma modelagem estocástica, baseada na teoria das variáveis regionalizadas, em sua relação apenas com a distribuição espacial dela própria. Os modelos empíricos mais comuns são a 'krigagem' em suas várias formas (ordinária, simples, com covariáveis auxiliares, entre outras).

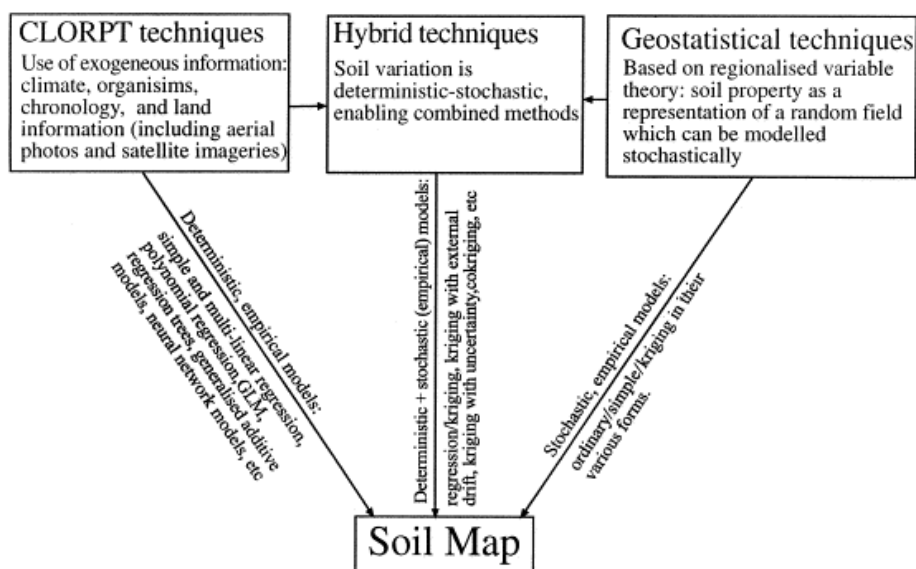


Figura 05. Representação esquemática dos tipos de modelagem aplicadas em MDS (Minasny and McBratney, 2016)

Podemos caracterizar o mapeamento digital de solos então pelo uso de covariáveis ambientais e morfometria, em escalas variadas, indo numa abordagem do ponto ao mapa. Muito avanço tem sido obtido no MDS para atributos de solos, mas existem poucos trabalhos quando se fala em mapeamento digital de classes de solos (Carvalho Jr, et al., 2020).

Todavia, de forma semelhante, podemos usar os bancos de dados de solos para modelagem de classes de solos. Vários modelos podem ser usados (machine learning, lógica fuzzy, structural equation modelling, etc). Uma característica intrínseca ao processo de MDS é a avaliação do erro, tanto para atributos quanto para classes, variando apenas o tipo de índice que se usa para uma ou outra tarefa.

Por exemplo, para classes de solos, alguns índices são obtidos através da matriz de confusão, como acurácia global, acurácia do produtor, acurácia do usuário e índice kappa. Para os modelos que trabalham com atributos de solos, os índices mais usados para avaliação do erro são o coeficiente de determinação (r^2), raiz da soma do erro quadrático, erro médio, entre outros.

Mas, segundo Carvalho Junior et al (2020), a experiência do pedólogo é necessária em quase todas as fases do MDS, desde a definição de covariáveis, elaboração do desenho amostral, coleta de dados no campo e confecção de relatórios e interpretações. Apenas uma fase de aprendizado de máquina (machine learning) não requer a expertise do pedólogo (Figura 06).

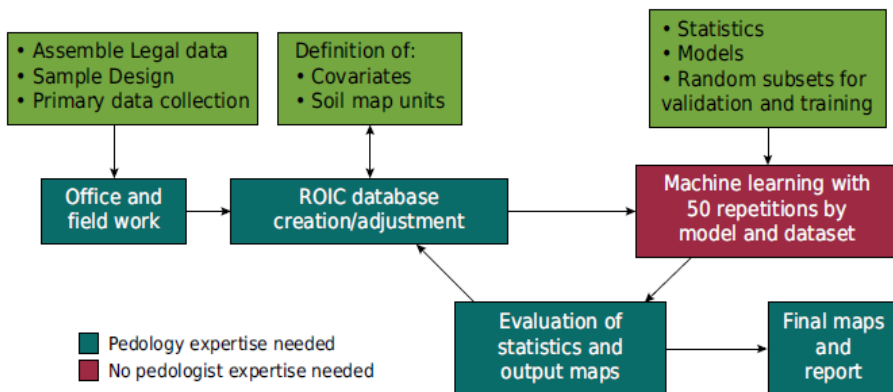


Figura 06. Esquema mostrando as etapas de MDS com e sem necessidade da expertise do pedólogo (Carvalho Junior et al., 2020)

71 NOVAS INTERPRETAÇÕES DE MAPAS DE SOLOS E APLICAÇÕES UTILITÁRIAS

A partir destes novos modelos de mapas de atributos e/ou classes, novas opções de interpretações surgem como a elaboração de zonas de manejo de solos, muito usado

em agricultura de precisão, mas que agora começa a ser utilizado de forma mais regional. Normalmente são aplicadas técnicas de aprendizado de máquina, ou modelos dirigidos pelos dados para este tipo de aplicação de interpretação e entendimento do conjunto de dados.

Por exemplo, Reyes et al. (2019) usaram análise de clusters para delinear zonas de manejo e encontraram que o uso de algoritmos de cluster Fuzzi são os mais adequados e mais usados para agricultura de precisão.

Também HE et al. (2018), desenvolveram aplicação para definir zonas de manejo pela análise de clusters chamada 'Management Zone Analyst 1.0.1' (Agricultural Research Service, University of Missouri-Columbia). Eles usaram uma combinação de variáveis como elevação, condutividade elétrica aparente (ECah), ECah e %Na; elevação e ECah e %Na, elevação e pH1:1 e %Na).

De acordo com Verma et al. (2018), a análise de clusters lida com a segmentação de um conjunto de N objetos em grupos (clusters) de maneira que um mesmo tipo de dado cai num cluster diferente daquele de outro dado dissimilar. O resultado da análise de cluster revela a estrutura interna e melhora o entendimento dos dados e da área de estudo. Segundo o autor, existem muitos algoritmos para análise de cluster disponíveis para este tipo de abordagem.

Pinheiro et al. (2019), em área de solos salinos na Bahia utilizaram mapas Na, CEC, Argila e Areia em distintas profundidades para estabelecer zonas de manejo através de análise de cluster, apontando regiões com limitações do ponto de vista físico-químico, de outras regiões com limitação de caráter químico ou físico, além de áreas sem limitações, provendo informações de caráter estratégico para manejo dos solos.

De fato, o MDS usa todo o arsenal tecnológico disponível, tanto de dados, de softwares, de modelos, incluindo a combinação de técnicas. Por exemplo, Wadoux et al. (2018) usaram geoestatística com dados gamma, e MDE para mapear propriedades dos solos. Já Hosek et al. (2018) usaram difratometria de raios X para mapeamento geoquímico em áreas inundadas buscando pontos de poluição.

Combinando dados de MDE, Landsat e litologia, Bhering et al. (2016) conseguiram mapear areia, argila e carbono sob diferentes resoluções espaciais. Vasques, G.M. et al. (2016) mapearam COS, granulometria e retenção de água usando dados MDE e de litologia. Muzzamal, M. et al. (2018) também mostraram ser possível o uso de leituras de raios gamma e eletromagnetismo para mapear as frações granulométricas do solo. Já Gallo, B.C. et al. (2018) usou imagens multitemporais para quantificar atributos superficiais de solos e sua relação com a classe de solo e geologia.

Sapia, V. et al. (2017) usaram tomografia de resistividade elétrica e magnetometria para mapear a profundidade e metais numa área de depósito de lixo. Para estudar os 'terroirs' na Itália, Priori, S. et al. (2019) usaram uma combinação de sensores proximais (magnetometria e gamma) para caracterizar a variabilidade espacial do solo em relação ao

Terroir.

Também combinando dados de diferentes fontes e sensores, Ceddia, M.B. et al. (2017) estudaram o estoque de carbono e granulometria dos solos de uma região amazônica com dados de MDE, multiespectrais e radar. Já Zhang, S.W. et al. (2012) mapearam MOS usando índices de terreno e variáveis categóricas (uso e mapa de classes de solo). Chagas, C.D. et al. (2016) mapearam a textura superficial de solos usando como covariáveis bandas e índices de uma imagem Landsat 5 no semiárido brasileiro.

8 | CONSIDERAÇÕES E TENDÊNCIAS

Segundo Rossiter (2018), a Tecnologia da Informação (TI) tem contribuído para as ciências ambientais. O mais óbvio é a proliferação de sistemas de sensores remotos (satélites e aeronaves), bem como os sensores proximais (escala de campo) e os instrumentos de laboratório. Por exemplo, Viscarra Rossel et al. (2017) comentaram sobre as bibliotecas espectrais, que podem combinar raios gamma, câmeras digitais, espectrômetros V-NIR, entre outros. Assim, múltiplos sensores são hoje rotina na chamada “agricultura de precisão”.

Laboratórios de espectrometria (visible and near infrared - vis-NIR, 400–2500 nm wavelengths) podem aumentar a capacidade análise de solos, substituindo em parte a química úmida que deixa resíduos. Aqui falamos da química limpa, sem resíduos para o meio ambiente.

Na parte física do solo também tem havido o desenvolvimento de aplicações como por exemplo a estimativa de granulometria por Laser diffraction granulometry (Makó et al., 2017) e estabilidade do agregado (Rawlins et al., 2015). Também o Laser scanner (Hirmas et al., 2016) e raio X (Helliwell et al., 2013) tem sido avaliados para quantificar a estrutura dos solos.

Pelo desenvolvimento da TI, acreditamos que os dados provenientes de gamma espectrômetros são bastante promissores, pois estão se tornando mais acessíveis (preço e disponibilidade) e os instrumentos estão se modernizando e sendo aplicados em várias plataformas.

Sendo assim, iniciativas em validar e implementar técnicas de mapeamento digital de solos e interpretações técnicas, disseminar o conhecimento em uso e conservação do solo e da água devem ser encorajadas, tendo em vista o cenário atual visando uma agricultura de base sustentável ao produtor rural, em prol do aumento da produção, diversificação e competitividade da atividade agropecuária, em consonância com as ações do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos (PronaSolos).

REFERÊNCIAS

- BHERING, S.B.; CHAGAS, C.S.; CARVALHO JUNIOR, W.; PEREIRA, N.R.; FILHO, B.C.; PINHEIRO, H.S.K. **Mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos Random Forest sob diferentes resoluções espaciais.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 51, n. 9, p. 1359–1370, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900035.
- CAMPBELL, D.M.H.; WHITE, B.; ARP, P.A. **Modeling and mapping Soil resistance to penetration and rutting using LiDAR-derived digital elevation data.** Journal of Soil and Water Conservation, [S. l.], v. 68, n. 6, p. 460–473, 2013. DOI: 10.2489/jswc.68.6.460.
- CARVALHO JUNIOR, W.; PEREIRA, N.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; CALDERANO FILHO, B.; PINHEIRO, H.S.K.; CHAGAS, C.S.; BHERING, S.B.; PEREIRA V.R.; LAWALL, S. **Sample design effects on soil unit prediction with machine: randomness, uncertainty, and majority map.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2020; DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcscs20190120>
- CARVALHO JUNIOR, W.de; LAGACHERIE, P.; DA SILVA CHAGAS, C.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S.B. **A regional-scale assessment of digital mapping of soil attributes in a tropical hillslope environment.** Geoderma, v. 232–234, p. 479–486, 2014a. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.06.007.
- CARVALHO JÚNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; MUSELLI, A.; PINHEIRO, H.S.K.; PEREIRA, N.S.; BHERING, S.B. **Método do hipercubo latino condicionado para a amostragem de solos na presença de covariáveis ambientais visando o mapeamento digital de solos.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 386–396, 2014b. DOI: 10.1590/S0100-06832014000200003.
- CARVALHO JUNIOR, W.de; CHAGAS, C.S.; LAGACHERIE, P.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S.B. **Evaluation of statistical and geostatistical models of digital soil properties mapping in tropical mountain regions.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, n. 3, p. 706–717, 2014c. DOI: 10.1590/s0100-06832014000300003.
- CEDDIA, M.; GOMES, A.; VASQUES, G.; PINHEIRO, É. **Soil Carbon Stock and Particle Size Fractions in the Central Amazon Predicted from Remotely Sensed Relief, Multispectral and Radar Data.** Remote Sensing, v. 9, n. 2, p. 124, 2017. DOI: 10.3390/rs9020124.
- CHAGAS, C.S.; DE CARVALHO JUNIOR, W.; BHERING, S.B.; CALDERANO FILHO, B. **Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions.** Catena, v. 139, p. 232–240, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.01.001.
- CHENG, H.; SHEN, R.; CHEN, Y.; WAN, Q.; SHI, T.; WANG, J.; WAN, Y.; HONG, Y.; LI, X. **Estimating heavy metal concentrations in suburban soils with reflectance spectroscopy.** Geoderma, v. 336, n. November 2017, p. 59–67, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.08.010.
- DA SILVEIRA, H.L.F.; GALVÃO, L.S.; SANCHES, L.D.A.; DE SÁ, I.B.; TAURA, T.A. **Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 73, n. May, p. 179–190, 2018. DOI: 10.1016/j.jag.2018.06.016.
- DEMATTÊ, J.A.M.; DOTTO, A.C.; BEDIN, L.G.; SAYÃO, V.M.; SOUZA, A.B.E. **Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: Constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact.** Geoderma, [S. l.], v. 337, n. May 2018, p. 111–121, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.010.

- DEMATTÉ, J.A.M. et al. **The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges**. *Geoderma*, v. 354, n. August, p. 113793, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.05.043.
- DENNERLEY, C.; HUANG, J.; NIELSON, R.; SEFTON, M.; TRIANTAFILIS, J. **Identifying soil management zones in a sugarcane field using proximal sensed electromagnetic induction and gamma-ray spectrometry data**. *Soil Use and Management*, v. 34, n. 2, p. 219–235, 2018. DOI: 10.1111/sum.12410.
- ENGLAND, J.R. & ROSSEL, R.A.V. **Proximal sensing for soil carbon accounting**. *Soil*, v. 4, n. 2, p. 101–122, 2018. DOI: 10.5194/soil-4-101-2018.
- FALCIGLIA, Pietro P.; BIONDI, Lorena; CATALANO, Roberto; IMMÈ, Giuseppina; ROMANO, Stefano; VAGLIASINDI, Federico G. A. **Preliminary investigation for quali-quantitative characterization of soils contaminated with 241Am and 152Eu by low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with small size γ -ray spectrometer: detection efficiency and minimum detectable activity (MDA) concentration assessment**. *Journal of Soils and Sediments*, v. 18, n. 6, p. 2399–2409, 2018. DOI: 10.1007/s11368-017-1720-6.
- GALLO, B.C.; DEMATTÉ, J.A.M.; RIZZO, R.; SAFANELLI, J.L.; MENDES, W.S.; LEPSCH, I.F.; SATO, M.V.; ROMERO, D.J.; LACERDA, M.P.C. **Multi-temporal satellite images on topsoil attribute quantification and the relationship with soil classes and geology**. *Remote Sensing*, v. 10, n. 10, 2018. DOI: 10.3390/rs10101571.
- GATIS, N.; LUSCOMBE, D. J.; CARLESS, D.; PARRY, L. E.; FYFE, R. M.; HARROD, T. R.; BRAZIER, R. E.; ANDERSON, K. **Mapping upland peat depth using airborne radiometric and lidar survey data**. *Geoderma*, v. 335, n. February 2018, p. 78–87, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.041.
- HE, Y.; DESUTTER, T.; NORLAND, J.; CHATTERJEE, A.; CASEY, Frank; CLAY, D. **The measurement, prediction, and development of soil management zones in low-relief sodic soils**. *Precision Agriculture*, [S. l.], v. 19, n. 5, p. 858–875, 2018. DOI: 10.1007/s11119-018-9561-x.
- HELLIWELL, J. R.; STURROCK, C. J.; GRAYLING, K. M.; TRACY, S. R.; FLAVEL, R. J.; YOUNG, I. M.; WHALLEY, W. R.; MOONEY, S. J. **Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: A review**. *European Journal of Soil Science*, [S. l.], v. 64, n. 3, p. 279–297, 2013. DOI: 10.1111/ejss.12028.
- HIRMAS, D.R.; GIMENEZ D.; MOME FILHO, E.A.; PATTERSON, M.; DRAGER, K.; PLATT, B.F.; ECK, D.V. **Quantifying soil structure and porosity using three-dimensional laser scanning**. In: HARTEMINK A.E AND MINASNY B. (editors). *Digital Soil Morphometrics, Progress in Soil Science*, v. 1, n. January, p. 425–433, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-28295-4.
- HOŠEK, M.; MATYS GRYGAR, T.; ELZNICOVÁ, J.; FAMĚRA, M.; POPELKA, J.; MATKOVIČ, J.; KISS, T. **Geochemical mapping in polluted floodplains using in situ X-ray fluorescence analysis, geophysical imaging, and statistics: Surprising complexity of floodplain pollution hotspot**. *Catena*, v. 171, n. July, p. 632–644, 2018. DOI: 10.1016/j.catena.2018.07.037.
- HUTCHINSON, M.F.; GALLANT, J.C. **Digital elevation models and representation of terrain shape**. In: WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (Editores). *Terrain analysis: principles and applications*. New York: John Wiley and Sons, 2000. p. 29-50.

JI, W.; ADAMCHUK, V.I.; CHEN, S.C.; MAT SU, A.; ISMAIL, A.; GAN, Q.J.; SHI, Z.; BISWAS, A. **Simultaneous measurement of multiple soil properties through proximal sensor data fusion: A case study.** *Geoderma*, v. 341, n. December 2018, p. 111–128, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.006.

KNADEL, M.; ARTHUR, E.; WEBER, P.; MOLDRUP, P.; GREVE, M.H.; CHRYSODONTA, Z.P.; DE JONGE, L.W. **Soil Specific Surface Area Determination by Visible Near-Infrared Spectroscopy.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 82, n. 5, p. 1046–1056, 2018. DOI: 10.2136/sssaj2018.03.0093.

LAGACHERIE, P. & MCBRATNEY, A.B. **Spatial Soil Information Systemns and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping.** In: *Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective*. P. Lagacherie, A.B. McBratney, M. Voltz (editores). *Developments in Soil Science*, v. 31, p. 3-22 (600), 2006. ISBN: 978-0-444-52958-9.

MAKÓ, A.; TÓTH, G.; WEYNANTS, M.; RAJKAI, K.; HERMANN, T.; TÓTH, B. **Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values.** *European Journal of Soil Science*, [S. I.], v. 68, n. 5, p. 769–782, 2017. DOI: 10.1111/ejss.12456.

MANAGE, L.P.M.; GREVE, M.H.; KNADEL, M.; MOLDRUP, P.; DE JONGE, L.W.; KATUWAL, S. **Visible-Near-Infrared Spectroscopy Prediction of Soil Characteristics as Affected by Soil-Water Content.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 82, n. 6, p. 1333–1346, 2018. DOI: 10.2136/sssaj2018.01.0052.

MANAGE, L.P.M.; KATUWAL, S.; NORGAARD, T.; KNADEL, M.; MOLDRUP, P.; DE JONGE, L.W.; GREVE, M.H. **Estimating Soil Particle Density using Visible Near-infrared Spectroscopy and a Simple, Two-compartment Pedotransfer Function.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 83, n. 1, p. 37–47, 2019. DOI: 10.2136/sssaj2018.06.0217.

MARQUES, K.P.P.; RIZZO, R.; DOTTO, A.c.; SOUZA, A.B.E; MELLO, F.A.O.; NETO, L.G.M.; ANJOS, L.H.C.do.; DEMATTÊ, J.A.M. **How qualitative spectral information can improve soil profile classification?** *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. 27, n. 2, p. 156–174, 2019. DOI: 10.1177/0967033518821965.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. **On digital soil mapping.** *Geoderma*, v.117, p. 3-52. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. **Digital soil mapping: A brief history and some lessons.** *Geoderma*, v. 264, p. 301–311, 2016. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.07.017.

MINASNY, B.; MALONE, B.; STOCKMANN, U.; ODGERS, N.; MCBRATNEY, A. B. **Pedometrics. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, p. 1–10, 2014. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.09163-6.

MOURA-BUENO, J.M.; DALMOLIN, R.S.D.; TEN CATEN, A.; DOTTO, A.C.; DEMATTÊ, J. A. M. **Stratification of a local VIS-NIR-SWIR spectral library by homogeneity criteria yields more accurate soil organic carbon predictions.** *Geoderma*, v. 337, n. October 2018, p. 565–581, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.10.015.

MUZZAMAL, M.; HUANG, J.; NIELSON, R.; SEFTON, M.; TRIANTAFILIS, J. **Mapping soil particle-size fractions using additive log-ratio (ALR) and isometric log-ratio (ILR) transformations and proximally sensed ancillary data.** *Clays and Clay Minerals*, v. 66, n. 1, p. 9–27, 2018. DOI: 10.1346/CCMN.2017.064074.

OLIVEIRA, B.L.; MEDEIROS, L.R.; FARIAS, G.S.de. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: um olhar sobre sua história.** Viçosa, MG. 2015. E-book. 177p. ISBN: 978-85-86504-13-6. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/wp-content/uploads/2014/01/ebook.pdf>. Acesso em: 10 set. 2020.

PEDOMETRICS.ORG – Disponível em: <http://pedometrics.org/the-history-of-pedometrics/>. Acesso em: 10 set. 2020. RECENA, R.; FERNÁNDEZ-CABANÁS, V.M.; DELGADO, A. **Soil fertility assessment by Vis-NIR spectroscopy: Predicting soil functioning rather than availability indices.** *Geoderma*, v. 337, n. March 2018, p. 368–374, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.049.

PINHEIRO, H.S.K.; XAVIER, P.A.M.; ANJOS, L.H.C; CHAGAS, C.S.; CARVALHO JÚNIOR, W. **Pedometric Tools Applied to Zoning Management of Areas in Brazilian Semi-arid Region.** *Multifunctionality and Impacts of Organic and Conventional Agriculture*, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.88526.

PINHEIRO, H.S.K.; CHAGAS, C.S.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DOS ANJOS, L.C.H. **Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 9, p. 1384–1394, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900024.

PRIORI, S.; PELLEGRINI, S.; PERRIA, R.; PUCCIONI, S.; STORCHI, P.; VALBOA, G.; COSTANTINI, E.A.C. **Scale effect of terroir under three contrasting vintages in the Chianti Classico area (Tuscany, Italy).** *Geoderma*, v. 334, n. July 2018, p. 99–112, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.048.

RAWLINS, B. G.; TURNER, G.; WRAGG, J.; MCLACHLAN, P.; LARK, R. M. **An improved method for measurement of soil aggregate stability using laser granulometry applied at regional scale.** *European Journal of Soil Science*, v. 66, n. 3, p. 604–614, 2015. DOI: 10.1111/ejss.12250.

REDDY, A.D.; HAWBAKER, T.J.; WURSTER, F.; ZHU, Z.; WARD, S.; NEWCOMB, D.; MURRAY, R. **Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal LiDAR.** *Remote Sensing of Environment*, [S. l.], v. 170, p. 306–316, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.017.

REINHARDT, N.; HERRMANN, L. **Gamma-ray spectrometry as versatile tool in soil science: A critical review.** *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 182, n. 1, p. 9–27, 2019. DOI: 10.1002/jpln.201700447.

REYES, J.; WENDROTH, O.; MATOCHA, C.; ZHU, J. **Delineating Site-Specific Management Zones and Evaluating Soil Water Temporal Dynamics in a Farmer's Field in Kentucky.** *Vadose Zone Journal*, v. 18, n. 1, p. 1–19, 2019. DOI: 10.2136/vzj2018.07.0143.

ROSSITER, D.G. **Past, present & future of information technology in pedometrics.** *Geoderma*, v. 324, n. March, p. 131–137, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.03.009.

SALAZAR, S.E.; GARNER, C.D.; COFFMAN, R.A. **Development of a multimode field deployable lidar instrument for topographic measurements of unsaturated soil properties: Instrument description.** *Remote Sensing*, v. 11, n. 3, p. 1–17, 2019. DOI: 10.3390/rs11030289.

SAPIA, V.; BACCHESCHI, P.; VILLANI, F.; TARONI, M.; MARCHETTI, M. **Multidisciplinary geophysical approach to map a disposal site: The Ponza island case study.** *Journal of Applied Geophysics*, v. 138, p. 264–274, 2017. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.02.001.

VASQUES, G.M.; COELHO, M.R.; DART, R.O.; OLIVEIRA, R.P.; TEIXEIRA, W.G. **Mapping soil carbon, particle-size fractions, and water retention in tropical dry forest in Brazil.** *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1371–1385, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900036.

VERMA, R.R.; MANJUNATH, B.L.; SINGH, N.P.; KUMAR, A.; ASOLKAR, T.; CHAVAN, V.; SRIVASTAVA, T.K.; SINGH, P.. **Soil mapping and delineation of management zones in the Western Ghats of coastal India.** *Land Degradation and Development*, v. 29, n. 12, p. 4313–4322, 2018. DOI: 10.1002/ldr.3183.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; LOBSEY, C.R.; SHARMAN, C.; FLICK, P.; MCLACHLAN, G. **Novel Proximal Sensing for Monitoring Soil Organic C Stocks and Condition.** *Environmental Science and Technology*, v. 51, n. 10, p. 5630–5641, 2017. DOI: 10.1021/acs.est.7b00889.

WADOUX, A.; BRUS, D.J.; HEUVELINK, G.B. M. **Accounting for non-stationary variance in geostatistical mapping of soil properties.** *Geoderma*, v. 324, n. March, p. 138–147, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.03.010.

XIA, Y.; UGARTE, C.M.; GUAN, K.; PENTRAK, M.; WANDER, M.M. **Developing Near- and Mid-Infrared Spectroscopy Analysis Methods for Rapid Assessment of Soil Quality in Illinois.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 82, n. 6, p. 1415–1427, 2018. DOI: 10.2136/sssaj2018.05.0175.

XU, S.; ZHAO, Y.; WANG, M.; SHI, X. **Quantification of Different Forms of Iron from Intact Soil Cores of Paddy Fields with Vis-NIR Spectroscopy.** *Soil Science Society of America Journal*, v. 82, n. 6, p. 1497–1511, 2018. DOI: 10.2136/sssaj2018.01.0014.

ZHANG, S.; HUANG, Y.; SHEN, C.; YE, H.; DU, Y. **Geoderma Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information.** *Geoderma*, v. 171–172, p. 35–43, 2012. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.07.012.